МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЯРКОГО МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА

MULTICHANNEL ANALYTICAL X-RAY SYSTEM ON THE BASIS OF BRIGHT MICROFOCUS SOURCE

А.Турьянский^{1,3}, д.ф.-м.н., Н.Герасименко^{1,2}, д.ф.-м.н., Я.Станишевский³, д.х.н., С.Гизжа^{1,3}, Д.Смирнов^{1,2} / algeo-tour@yandex.ru
A.Turyansky^{1,3}, D.Sc., N.Gerasimenko^{1,2}, D.Sc., Ya.Stanishevskiy³, D.Sc., S.Gizha^{1,3}, D.Smirnov^{1,2}

Предложена структурная схема многоканального аналитического рентгеновского комплекса (МАРК) с ярким микрофокусным источником, обеспечивающая реализацию основных методов рентгеновской диагностики на базе единой автоматизированной системы. Сформулированы общие требования к параметрам источника для проведения комплексных измерений с помощью МАРК. Рассмотрены методы формирования различных типов пучков излучения на основе фокусирующей и дисперсионной рентгеновской оптики и организация рабочих станций.

A structural scheme of a multi-channel X-ray analytical system with a bright microfocus source designed to implement the basic methods of X-ray diagnosis based on a single automated system is proposed. The general requirements to the parameters of the source for integrated measurements using multi-channel X-ray analytical system were developed. The methods of formation of various types of radiation beams based on the focusing and dispersive X-ray optics and the organization of workstations were considered.

Методы рентгеновской диагностики материалов и наноструктур являются во многих случаях основой аналитической базы современного высокотехнологичного производства и одним из основных инструментов при разработке новых материалов и изделий на их основе. При этом одна из главных задач диагностики материалов заключается в получении наиболее полной информации о свойствах исследуемого или контролируемого объекта различными методами и сопоставлении полученных результатов. Современное рентгеновское приборостроение предлагает использовать специализированные аналитические системы для решения конкретных измерительных задач: рентгеновскую флуоресцентную спектрометрию для определения элементного состава; малоугловое рассеяние для определения параметров неомогенных наноструктурированных объектов; спектрометрию поглощения для изучения энергетической структуры глубоких уровней в материалах;

дифрактометрию для определения структурных параметров и фазового анализа; проекционную микроскопию и томографию для визуализации внутренней структуры объектов; рефлектометрию для изучения слоистых наноструктур и границ раздела. Каждая из перечисленных систем имеет собственный источник излучения, измерительную платформу и программное обеспечение, и их объединение в единый измерительный комплекс невозможно по конструктивным соображениям.

В качестве интегрированной аналитической системы можно рассматривать синхротронный центр [1, 2], который включает ускорители электронов, общее накопительное кольцо для электронов высокой энергии и встроенные в него ондуляторы, являющиеся источниками мощного рентгеновского излучения. На выходе каждого из ондуляторов размещается специализированный измерительный канал, длина которого может составлять десятки метров. Стабильный режим генерации может непрерывно поддерживаться несколько

¹ Физический институт РАН им. П.Н.Лебедева / Lebedev Physical Institute of RAS

² Национальный исследовательский университет "МИЭТ" / National research University "MIET"

³ Российский университет дружбы народов (РУДН) / People's Friendship University of Russia (PFUR)

рабочих смен. Однако количество современных синхротронных центров третьего поколения сравнительно мало, а возможности исследования для широкого круга пользователей ограничены длительными процедурами подачи научного проекта на конкурс на каждый из измерительных каналов и высокой стоимостью их эксплуатации. Кроме того, к рассмотрению не принимаются задачи, которые, по мнению экспертной комиссии, носят рутинный характер. По этим причинам синхротронные центры не могут использоваться для оперативного решения проблемы комплексной диагностики.

В настоящей работе предлагается новая концепция, которая заключается в создании многоканального аналитического рентгеновского комплекса (МАРК), обеспечивающего реализацию всех основных методов рентгеновской диагностики на базе общего яркого микрофокусного источника и единой автоматизированной системы управления.

ВЫБОР ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим основные требования к источнику рентгеновского излучения для предлагаемого многоканального комплекса. Их не следует трактовать как принципиально необходимые, однако их невыполнение будет приводить к резкому ухудшению основных пользовательских характеристик системы в части функциональных возможностей, производительности, чувствительности и точности измерений, габаритов, энергопотребления.

Во-первых, источник должен быть микрофокусным, что обеспечивает возможность фокуси-

ровки излучения для локального контроля параметров и получения направленных потоков высокой интенсивности. Как показывает практика, для эффективного применения рентгеновской оптики необходимо, чтобы размер фокуса удовлетворял требованию $R_s \leq 10$ мкм. При этом яркость источника должна обеспечивать прямой или сфокусированный поток монохроматического излучения в телесный угол (Ω_s) около 1 мрад не менее 10^9 – 10^{10} фотон/с. Это необходимо для измерений в широком динамическом диапазоне интенсивности сигнала, высоких чувствительности и производимости исследований и контроля.

Во-вторых, источник должен обеспечивать генерацию как интенсивных спектральных линий, так и непрерывной части спектра, либо должен иметь возможность перенастройки энергии генерируемого излучения. Монохроматические линии необходимы для точного определения различных структурных параметров, а непрерывная часть спектра или возможность перенастройки необходимы, в частности, в рентгеновской спектроскопии поглощения для определения ориентации и параметров обратной решетки кристаллов.

В-третьих, максимальная энергия спектра $E_{\max}$ должна составлять порядка 100 кэВ, что обеспечивает возможность визуализации и 3D-реконструкции внутренней структуры как органических, так и неорганических объектов, значительно расширяя область применения комплекса. При энергии спектра $E < 6$ кэВ достигается эффективное возбуждение рентгеновской флуоресценции легких элементов и возможно получение высококонтрастных изображений органиче-

The methods of X-ray diagnostics of materials and nanostructures often provide the basis for the analytical framework of the up-to-date high-tech production and one of the major tools in the development of new materials and products based on them. In this context, one of the key objectives associated with diagnosing materials is to obtain the most complete information about the properties of the tested or controlled object by various methods and compare the results. The modern X-ray instrument making

industry proposes to use dedicated analytical systems for solving specific measuring tasks, e.g. X-ray fluorescence spectrometers to determine the elemental composition; small-angle scattering to determine the parameters of inhomogeneous nano objects; absorption spectrometry to study the energy structure of the deep levels in the materials; diffraction to determine the structural parameters and phase analysis; the projection microscopy and imaging for visualising the internal structures of objects;

reflectometry for studying the layered nanostructures and interfaces. Each of these systems has its own light source of radiation, measurement platform and software; it is not possible to combine them into a single measurement system for structural reasons.

As an integrated analytical system a synchrotron centre [1, 2], which includes electron accelerators, the total storage ring for high-energy electrons and undulators being the sources of intense X-ray radiation and embedded therein, can be considered. At

ских объектов малого размера. Поэтому в качестве достаточного рабочего диапазона энергий целесообразно принять интервал от 6 до 100 кэВ. Для точного определения структурных параметров материалов в спектре источника должны присутствовать интенсивные спектральные линии с энергией около 10 кэВ, что соответствует длине волны излучения 0,1 нм, то есть порядку типичной величины межплоскостных расстояний в различных материалах.

В-четвертых, необходимо, чтобы габариты рентгеновского источника позволяли размещать его в обычном лабораторном помещении и устанавливать на расстоянии 5–50 см от выходных окон коллимационное, фокусирующее и измерительное оборудование. Это обеспечивает компактность станций и организации управления.

В-пятых, оптимально, если излучение рентгеновского источника направлено в широкий телесный угол $\Omega_i = (2-4)\pi$, или существует возможность быстрой настройки направления генерации в указанном диапазоне телесных углов. Это необходимо для одновременного подключения к источнику набора рабочих станций.

И, наконец, источник должен обеспечивать непрерывную генерацию излучения в течение не менее одной рабочей смены (6–8 ч).

Современные промышленные рентгеновские источники на базе стандартных рентгеновских трубок и трубок с вращающимся анодом не удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Трубки со стационарным анодом, используемые

для рентгеновской микроскопии и микрофотографии, не обеспечивают требуемые потоки излучения, а специализированные источники с вращающимся анодом имеют размер фокуса около 100 мкм, что препятствует эффективной фокусировке излучения и получению изображений с высоким пространственным разрешением. Поэтому целесообразно рассмотреть ряд перспективных систем, которые находятся на экспериментальной стадии разработки.

Одним из доступных лабораторных средств генерации рентгеновского излучения спектра в телесный угол 2π в широком спектральном диапазоне является облучение мишени сфокусированным пучком фемтосекундного лазера [3, 4], обеспечивающее получение высокотемпературной плазмы при возбуждении материала мишени оптическим импульсом. Преимуществом такого средства генерации является простота изменения спектра путем замены мишени и возможность исследования быстропротекающих процессов при синхронизации рентгеновского импульса с заданным временным интервалом после возбуждения объекта. Однако конверсионная эффективность преобразования оптического излучения в рентгеновское мала, а процесс излучения принципиально импульсный, нестабильный и сопровождается абляцией материала. Поэтому источник, основанный на возбуждении лазером высокотемпературной плазмы, может в перспективе рассматриваться только как независимое дополнение к аналитическому комплексу. Безусловный интерес

the output of each of the undulators specialised measuring channel, the length of which can be tens of meters, is placed. The stable generation mode can be continuously maintained for several shifts. However, the number of modern third-generation synchrotron centres is relatively low, and research opportunities for a wide range of users limit the duration of the procedure for filing a research project for the competition for each of the measurement channels and the high cost of operation. In addition, the task will not be accepted, in the opinion of the expert commission, are

routine in nature. For these reasons, synchrotron centres cannot be used for rapid diagnosis of complex problem solving.

This paper proposes a new concept, which is to create a multi-channel X-ray analytical system to ensure the implementation of all major X-ray diagnostic methods based on the total bright microfocus source and a single automated control system.

CHOOSING THE SOURCE OF RADIATION

We consider the basic requirements to the X-ray source for the proposed multi-channel system.

They should not be interpreted as essential but their failure would lead to a sharp deterioration of characteristics of the main user of the system in terms of functionality, performance, measurement sensitivity and accuracy, size and power consumption.

First, the source should be microfocal that allows focusing of the radiation for the local control of parameters and obtaining the directed flows of high intensity. As practice shows, for the effective application of X-ray optics it is essential that the size of the focus meets the requirement $R_s \leq 10 \mu\text{m}$. The brightness of the

представляют также разрабатываемые в настоящее время петаваттные лазеры, которые можно использовать для генерации в плазме направленного рентгеновского излучения, однако пока их нельзя рассматривать как доступные лабораторные источники излучения.

Сравнительно эффективным средством генерации рентгеновского излучения являются установки с использованием Z- и X-пинча [5-7]. Эффект сжатия токового канала под действием магнитного поля, индуцированного сильным током в тонких металлических проволоках, обеспечивает получение высокотемпературной плазмы, излучающей в полный телесный угол в широком рентгеновском диапазоне спектра, при эффективном размере фокуса около 10 мкм. Поскольку импульс излучения сопровождается полным испарением мишени, такая система не может работать в стационарном режиме, и, как и в случае возбуждения фемтосекундным лазером, ее следует рассматривать только как возможное дополнение к аналитическому комплексу.

Высокие значения потока излучения до $5 \cdot 10^{11}$ фотон/с и спектральная яркость $2 \cdot 10^{12}$ фотон/(с·мм²·мрад²·0,1%) получены в настоящее время на установках, в которых используется эффект обратного комптоновского рассеяния генерируемых лазером оптических фотонов с энергией около 1 эВ на высокоэнергетичных электронах [8-10]. Как показывают расчеты [9, 11], с помощью источников указанного типа при решении ряда технических вопросов могут быть достигнуты потоки

10^{13} – 10^{14} фотон/с в телесный угол $\omega_c \sim E_0/E$, где E и E_0 – энергия электрона, сталкивающегося с оптическим фотоном, и энергия покоя электрона соответственно. Для перевода оптического излучения в рентгеновский диапазон с длиной волны около 0,1 нм при обратном комптоновском рассеянии достаточно энергии электронов порядка 10 МэВ, поэтому такие источники строятся на базе компактных ускорителей, которые могут быть размещены в лабораторных помещениях. Важным достоинством лазерно-электронного источника является возможность изменения генерируемой полосы спектра в широком энергетическом диапазоне, что позволяет реализовать на практике различные спектрометрические методы. Достигнутый размер фокуса менее 10 мкм обеспечивает возможность применения фокусирующей оптики и получения изображений внутренней структуры с высоким пространственным разрешением. Однако типичный угол, в который излучается поток рентгеновских фотонов с энергией около 10 кэВ составляет обычно менее 0,01 ср и, соответственно, менее 0,001 доли полного телесного угла, поэтому такой источник не может быть использован для подключения нескольких рабочих станций для проведения комплексных исследований различными методами.

Перечисленным выше требованиям к источнику для многоканального комплекса удовлетворяет микрофокусный рентгеновский источник, недавно разработанный шведской компанией Excillum [12, 13]. Новизна предложенной

source should provide the direct or focused stream of the monochromatic radiation in a solid angle (Ω_s) about 1 mrad at least 10^9 – 10^{10} photons/s. It is necessary for measurements in a wide dynamic range of signal intensity, high sensitivity as well as research and control performances.

Secondly, the source should provide the generation of intense spectral lines and the continuous part of the spectrum, or should be able to reconfigure the power of the generated radiation. Monochromatic lines are required for the accurate determination of various structural parameters;

the continuous part of the spectrum or the possibility of readjustment are necessary particularly in the X-ray absorption spectroscopy to determine the orientation and parameters of the reciprocal crystal lattice.

Third, the maximum energy of the E_{max} range should be around 100 keV which allows visualisation and 3D-reconstruction of the internal structure of both organic and inorganic objects thereby significantly expanding the scope of the system. At an energy range of $E < 6$ keV achieved is efficient excitation of the X-ray fluorescence of light elements, and it is

possible to obtain high-contrast images with high organic objects of a small size. Therefore, it is correct to take the energy range of 6 keV to 100 keV as a sufficient operating range. To accurately determine the structural material parameters, the range of the source should have intense spectral lines with the power of about 10 keV that corresponds to the emission wavelength of 0.1 nm, i.e. a typical order of inter-planar spacing in various materials.

Fourthly, it is necessary that the dimensions of the X-ray source allow placing it in a common laboratory room and set at a distance

Рис.1. Схема генерации рентгеновского излучения с использованием жидкого металла в качестве анода: 1 – струя металла; 2 – электронный пучок; 3 – рентгеновское излучение; 4 – теплообменник; 5 – помпа; 6 – откачиваемый объем камеры.

Fig.1. Diagram of X-ray generation with liquid metal as the anode: 1 – metal stream; 2 – electron beam; 3 – X-rays; 4 – heat exchanger; 5 – pump; 6 – pumped volume of the chamber

конструкции заключается в том, что в качестве облучаемой электронами мишени используется струя жидкого металла на основе сплава Ga (95%) и In (5%). Указанный сплав находится в жидком состоянии при комнатной температуре и имеет

сравнительно низкое давление паров при температуре до 1000°C, что позволяет проводить прямое облучение струи металла сфокусированным электронным пучком. При этом, благодаря большой площади контакта металла с охлаждающей поверхностью теплообменного устройства, достигается быстрое снижение температуры сплава. Таким образом, удается получить плотность потока энергии при возбуждении излучения электронным пучком до 2,5 МВт/мм² и обеспечить рекордную спектральную яркость источника.

Упрощенная схема источника на жидком аноде показана на рис.1. Помпой создается непрерывная циркуляция жидкого металла в направлении, показанном стрелками. Давление составляет 20 МПа, а скорость потока металла 80 м/с. В промежулке, показанном пунктирным контуром, струя диаметром 0,2 мм выводится из трубопровода и облучается пучком электронов, который фокусируется магнитной линзой. Генерация излучения происходит в телесный угол Ω_i около 4π. Так как элементы конструкции излучателя не позволяют выводить из источника полный рентгеновский поток, то, как и в обычных рентгеновских трубках, излучение выводится через окна заданного размера. Отметим также, что часть рентгеновского спектра с энергией $E < 30$ кэВ поглощается в струе металла, и в указанной части спектра источник излучает в телесный угол Ω_i около 2π. Основные технические характеристики источника приведены в таблице.

of 5–50 cm from the output window the collimating, focusing and measuring equipment. This provides compactness for stations and management arrangements.

Fifth, it will be optimal, if the radiation of the X-ray source is directed in the wide solid angle of $\Omega_i = (2-4)\pi$ or there is a possibility of quick adjustment of the generation direction in this range of solid angles. This is necessary to simultaneously connect to a source of a set of workstations.

Finally, the source should provide continuous generation of radiation within at least one shift (6–8 hours).

The modern industrial X-ray sources based on standard X-ray tubes and the tubes with rotating anodes do not satisfy the requirements listed above. The stationary anode tubes used for X-ray microscopy and microtomography fail to provide the desired radiation fluxes, and special sources with rotating anodes have the focus size of about 100 μm, which prevents the efficient radiation focusing and obtaining the images with a high spatial resolution. Therefore, it is advisable to consider a number of advanced systems that are at the experimental stage of development.

One of the available laboratory facilities to generate the X-ray spectrum in a solid angle of 2π in a wide spectral range is the irradiation of the target by a focused beam of a femtosecond laser [3,4] that will ensure the high-temperature plasma in the excitation of the target material by the optical pulse. An advantage of such a generation tool is the ease of changing the spectrum by changing the target and the ability to study fast processes in synchronising the X-ray pulse with a predetermined time interval after the initiation of the object. However, the conversion

Основные технические характеристики микрофокусного рентгеновского источника на жидком аноде

Main technical characteristics of microfocus X-ray source with liquid anode

Минимальный размер фокуса, мкм Minimum focus spot size, μm		5
Максимальная мощность, Вт Maximum power, W	при размере фокуса 10 мкм Focus spot size of 10 μm	100
	при размере фокуса 20 мкм Focus spot size of 20 μm	200
Диапазон рабочего напряжения, кВ Operating voltage, kV		10–160
Рентгеновский диапазон непрерывного спектра, кэВ X-band continuous spectrum, keV		5–160
Длина волны интенсивной спектральной линии $\lambda(\text{GaK}\alpha_1)$, нм Wavelength of the intense spectral lines $\lambda(\text{GaK}\alpha_1)$, nm		0,134
Поток сфокусированного излучения GaK в угол 1 мрад, фотон/с Focused radiation stream of GaK in angle of 1 mrad, photon/s		109
Смещение положения фокуса за 24 ч, мкм Focus deviation during 24 h, μm		< 1
Габариты излучателя, см Dimensions of the emitter, cm		69 × 33,5 × 20

ВЫБОР СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧИХ СТАНЦИЙ

Для удобства эксплуатации многоканального аналитического комплекса оптимально размещение оборудования на горизонтальных платформах. При этом струя металла направляется по вертикали, а оси рентгеновских пучков ориентированы в горизонтальной плоскости. Область энергетического спектра $E < 30$ кэВ наиболее часто используется для структурных измерений материалов. Однако, как указывалось выше, в этой области спектра источник

излучает в телесный угол Ω_i около 2π , поэтому допустимые угловые положения осей рабочих пучков должны смещаться от касательной к струе металла в точке возбуждения электронным пучком в направлении к источнику возбуждения (рис.2). Угловой интервал α между осями пучков 1–6 формально ограничен необходимостью размещения у выходных окон источника коллимационных, юстировочных и фокусирующих элементов конструкции. Технические ограничения на количество каналов связано с наличием в корпусе

efficiency of transformation of the optical radiation in the X-ray one is low, and it is mainly impulse radiation, unstable and is accompanied by the ablation of material. Therefore, the source based on laser excitation by high-temperature plasma can only be regarded in the future as an independent addition to the analytical system. Petawatt lasers, which are also being developed at the moment and can be used to generate directed X-rays in plasma, are of particular interest; however, they cannot be considered as the available laboratory sources of radiation.

A comparatively effective tool of generating X-rays is the installation using Z- and X-pinch [5–7]. The effect of compression of the current channel under the influence of a magnetic field induced by the strong current in the thin metal wires produces high-temperature plasma emitting the full solid angle in a wide X-ray spectrum with the effective focus size of about 10 μm . Since the radiation pulse is accompanied by complete evaporation of the target, such a system cannot operate in a steady state, and, as in the case of excitation by a femtosecond laser, it

should be regarded only as a possible supplement to the analytical system.

The high values of the radiation flux up to $5 \cdot 10^{11}$ photons/s and spectral brightness $2 \cdot 10^{12}$ photons/(s · mm² · mrad² · 0.1%) obtained at the present time on the plants, which use the effect of inverse Compton scattering generated by the laser of optical photons with an energy of about 1 eV in the high-energy electrons [8–10]. Calculations show [9–11] that with the help of this type of sources in addressing a number of technical issues achieved can be the flows of 10^{13} – 10^{14} photons/s

Рис.2. Возможная схема расположения рабочих пучков: А – анод; В – электронная пушка; С – корпус излучателя; D – трубопровод; 1–8 – рентгеновские пучки
Fig.2. Possible arrangement of working beams: A – anode; B – electron gun; C – body of the radiator; D – pipeline; 1–8 – X-ray beams

Рис.3. Вариант схемы расположения рабочих станций: 1–4 – рабочие станции; А – анод; В – электронная пушка; С – корпус излучателя; D – трубопровод
Fig.3. Possible arrangement of workstations: 1–4 – workstations; A – anode; B – electron gun; C – body of the radiator; D – pipeline

излучателя элементов оборудования: электронной пушки, трубопроводов, затворов и датчиков параметров источника. В жесткой области спектра $E > 50$ кэВ излучение может дополнительно выводиться через струю металла в направлении пучков 7 и 8. Однако, как показывает практика эксплуатации, для проведения измерений, приборной настройки и установки образцов

различного типа необходимо обеспечить возможность доступа персонала к любой части оборудования станции, поэтому оптимально размещение вокруг источника четырех станций по схеме, показанной на рис.3.

Предложенная схема поясняется также дизайнерской разработкой вида рабочих станций в защитном корпусе, показанной на рис.4. Источник

in the solid angle $\omega_c \sim E_0/E$, where E and E_0 – energy of the electron colliding with an optical photon and the rest energy of the electron respectively. To convert the optical radiation into the X-ray spectrum with a wavelength of about 0.1 nm in inverse Compton scattering it is enough to have the energy of electrons in the range of 10 MeV; that is why such sources are based on compact accelerators that may be placed in laboratory premises. An important advantage of the laser and electron source is the ability to change the generated spectrum band in a wide

energy range thereby allowing you to put into practice a variety of spectrometric methods. The reached focus size less than 10 μm makes it possible to use focusing optics and obtaining images of the internal structure with the high spatial resolution. However, at which a typical angle a stream of X-ray photons with the energy about 10 keV is emitted is typically less than 0.01 cp and therefore less than 0.001 share of the total solid angle, therefore this source cannot be used to connect multiple workstations for a variety of complex research by various methods.

The microfocus X-ray source recently developed by the Swedish company Excillum [12, 13] satisfies the above requirements to a source of the multi-channel system. The novelty of the proposed design is that a liquid metal stream based on the alloy Ga (95%) and In (5%) is used as the target irradiated with electrons. The said alloy is in a liquid state at room temperature and has a relatively low vapour pressure at temperatures up to 1000°C enabling direct exposure of the metal stream by a focused electron beam. In this context, due to the large area of contact of the metal with the cooling surface

Рис.4. Проект аналитического комплекса МАРК с четырьмя рабочими станциями

Fig.4. Project of analytical complex with four workstations

излучения, как было показано на рис.3, находится в центральной части комплекса. Раздвижные панели кожуха обеспечивают необходимый доступ к измерительному оборудованию и возможность установки и переноса образцов. Управление отдельными станциями может осуществляться с компьютеров, установленных как в рабочем помещении, так и вне помещения в режиме удаленного доступа. Однако общее согласованное управление источником и отдельными станциями производится главным компьютером МАРК.

СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЧКОВ

Основными параметрами пучков, применяемых в современных измерительных системах, являются их спектр, форма и интенсивность. Микрофокусный рентгеновский источник в сочетании с фокусирующими

и коллимационными системами, а также средствами селекции спектра позволяет сформировать наиболее полный набор пучков, необходимых для комплексной диагностики. На рис.5 показаны основные типы пучков, которые могут создаваться в системе МАРК:

- конусный полихроматический пучок (1) для быстрой визуализации проекционных изображений, компьютерной томографии;
- веерный монохроматический пучок (2) для визуализации проекционных изображений, компьютерной томографии в заданном спектральном диапазоне;
- сходящийся фокусированный монохроматический или полихроматический пучок (3) для локальной диагностики параметров материалов;
- фокусированный квазипараллельный пучок (4) для структурной диагностики материалов;
- жестко коллимированный монохроматический пучок (5) для прецизионных измерений структурных параметров и рентгенооптических измерений.

Формирование конусного и веерного пучков 1 и 2 осуществляется с помощью управляемых диафрагм. Веерный пучок может быть предварительно монохроматизирован с помощью многослойных рентгеновских зеркал [14] или преломляющей призмы [15]. Сходящийся фокусированный монохроматический пучок (3) создается изогнутыми многослойными зеркалами [16], построенными по схеме Монтеля [17] или

of the heat exchange device, the alloy temperature can be reduced sooner. Thus, it is possible to obtain the energy flux density, when radiation is excited by an electron beam up to 2.5 mW/mm^2 and ensure the record spectral brightness of the source.

A simplified diagram of source on the liquid anode is shown in fig.1. The pump creates a continuous circulation of the liquid metal in the direction indicated by arrows. The pressure is 20 MPa and the flow rate of metal is 80 m/s. In the gap shown by the dotted line, the stream with a diameter of 0.2 mm and is taken

from the pipeline and is irradiated by an electron beam which is focused by the magnetic lens. Radiation is generated in the solid angle Ω_i about 4π . Since the elements of the design of the radiator do not allow the full output from the source of the X-ray flux, then, like in the conventional X-ray tubes, radiation is output through the window of a given size. It should also be noted that part of the X-ray spectrum with the energy of $E < 30 \text{ keV}$ is absorbed into the metal stream, and the source radiates into a solid angle Ω_i about 2π in this part of the spectrum. The key

technical characteristics of the source are given in table.

CHOOSING WORKSTATION LAYOUT

For ease of use of the multi-channel analytical system, it is optimal to place the equipment on the horizontal platforms, whereby the metal stream is directed vertically, and the axis of the X-ray beams are focused in the horizontal plane. The area of the energy spectrum $E < 30 \text{ keV}$ is most often used for the measurement of structural materials. However, as mentioned above, in this area of the spectrum the

Рис.5. Основные типы рентгеновских пучков для комплексной диагностики: А – микрофокусный рентгеновский источник; 1 – конусный пучок; 2 – веерный пучок; 3 – сходящийся фокусированный пучок; 4 – интенсивный квазипараллельный пучок; 5 – коллимированный монохроматический пучок

Fig.5. Main types of X-ray beams for complex diagnostics: А – microfocus X-ray source; 1 – conical beam; 2 – fan-shaped beam; 3 – converging focused beam; 4 – intense quasi-parallel beam; 5 – collimated monochromatic beam

Кирпатрика-Баэза [18]. С помощью поликапиллярной кумаровской оптики может быть получен фокусированный полихроматический пучок с диаметром фокуса d_f около 10 мкм [19, 20]. Отметим также, что в области энергий фотонов около 10 кэВ при диаметре фокуса

источника $d_s \leq 5$ мкм может применяться рефракционная оптика в виде составных рефракционных линз [21, 22]. Однако при этом необходима предварительная монохроматизация первичного излучения. Фокусированный квазипараллельный пучок (4) высокой интенсивности создается параболическими рентгеновскими зеркалами. Жестко коллимированный монохроматический пучок (5) с угловой расходимостью $\Delta\psi \leq 10''$ формируется путем последовательных отражений от бездислокационных кристаллов, например, кристаллов кремния. Дополнительные схемы формирования пучков и селекции спектра могут быть получены с помощью изогнутых кристаллов, полупрозрачных монохроматоров [23] и дисперсионной призмной оптики [24].

Создание предложенной в настоящей работе многоканальной аналитической систем МАРК позволит решить следующие актуальные проблемы:

- обеспечить доступ широкого круга специалистов в области разработки новых материалов и наноструктур к передовым средствам рентгеновской диагностики;
- объединить основные методы рентгеновской диагностики на базе единой автоматизированной системы;
- повысить точность и достоверность результатов измерений;

source emits in the solid angle Ω_i about 2π , therefore the permissible angular positions of the axes of subject beams should be displaced from the tangent line to the metal stream at the point of excitation by an electron beam in the direction of the source of excitation (fig.2). The angular interval α between axes of the beams 1-6 is formally limited to the need to place at the output windows of the source collimation, alignment and focusing elements of the structure. The technical restrictions on the number of channels are associated with the presence in the

radiator body of elements of the equipment, i.e. the electron gun, pipes, valves and gauges of the source parameters. In the hard part of the spectrum $E > 50$ keV radiation can be additionally put out from the metal stream in the direction of the beams 7 and 8. However, the operational practice shows that for the measurement, the instrument setup and installation of various types of samples it is necessary to allow staff access to any part of the station's equipment; so it is optimal to place four stations around the source according to the diagram shown in fig.3.

The proposed diagram is also due to the development of workstations in a protective housing as shown in fig.4. The radiation source, as shown in fig.3, is in the central part of the system. The sliding panels of the housing provide the necessary access to the measuring equipment and the ability to install and transfer samples. Individual stations can be controlled with the computers installed in the operating room and outside in the remote access mode. However, the overall coordinated management of the source and individual stations is effected by the computer of the system.

- обеспечить экономию средств на закупку и эксплуатацию оборудования.

В следующей работе нами будут рассмотрены варианты рабочих станций аналитического комплекса и представлен ряд экспериментальных результатов, полученных, в том числе, с использованием источника на жидком аноде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Willmott P. An introduction to Synchrotron Radiation: Techniques and Applications. John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 368 p.
2. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры вещества. – М.: Физматлит, 2007. 672 с.
3. Ovchinnikov A.V., Kostenko O.F., Chefonov O.V., Rosmej O.N., Andreev N.E., Agranat M.B., Duan J.L., Liu, J. and Fortov V.E. Characteristic X-rays generation under the action of femtosecond laser pulses on nanostructured targets // Laser and Particle Beams. 2011. Vol. 29. Iss. 02. P. 249–254.
4. Miaja-Avila L., O'Neil G.C., Uhlig J., Cromer C.L., Dowell M.L., Jimenez R., Hoover A.S., Silverman K.L., and Ullom J.N. Laser plasma x-ray source for ultrafast time-resolved x-ray absorption spectroscopy // Struct. Dyn. 2015. Vol. 2. P. 024301.
5. Shrestha I., Kantsyrev V.L., Safronova A.S., Esaulov A.A., Williamson K.M., Quart N.D., Osborne G.C., Weller M.E., Yilmaz M.F. Investigation of characteristics of hard x-rays produced during implosions of wire array loads on 1.6 MA Zebra generator // High Energy Density Physics. 2010. Vol. 6. Iss. 1. P. 113–120.
6. Пикуз С.А., Синарс Д.Б., Шелковенко Т.А., Чандлер К.М., Хаммер Д.А., Скобелев И.Ю., Иваненков Г.В. Рентгеноспектральное определение параметров горячих точек X-пинча // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 76. Вып. 8. С. 571–575.
7. Zucchini F., Bland S.N., Chauvin C., Combes P., Sol D., Loyer A., Roques B., Grunenwald J. Characteristics of a molybdenum X-pinch X-ray source as a probe source for X-ray diffraction studies // Rev. Sci. Instrum. 2015. Vol. 86. No. 3. P. 033507.
8. Graves W.S., Bessuille J., Brown P., Carbajo S., Dolgashev V., Hong K.-H., Ihloff E., Khaykovich B., Lin H., Murari K., Nanni E.A., Resta G., Tantawi S., Zapata L.E., Kärtner F.X., and Moncton D.E. Compact x-ray source based on burst-mode inverse Compton scattering at 100 kHz // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2014. Vol. 17. Iss. 12. P. 120701.
9. Graves W.S., Brown W., Kaertner F.X., and Moncton D.E. MIT inverse Compton source concept // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A. 2009. Vol. 608. Iss. 1. P. S103–S105.
10. Бессонов Е.Г., Виноградов А.В., Горбунков М.В., Турьянский А.Г., Фещенко Р.М., Шабалин Ю.В. Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения для меди-

SCHEME OF FORMATION OF X-RAY BEAMS

The main parameters of the beams used in modern measurement systems are their spectrum, shape and intensity. The microfocus X-ray source along with the focusing and collimation systems and the means of spectrum selection allow you to create the most complete set of beams required for a comprehensive diagnosis. Fig.5 shows the main types of beams that can be created in the system:

- the cone polychromatic beam (1) for a quick visualisation of the projection images and computer tomography;
- a fan-shaped monochromatic beam (2) for the visualisation of the projection images and computer tomography in a predetermined spectral range;
- the converging focused monochromatic or polychromatic beam (3) for the local diagnosis of material parameters;
- the focussed quasi-parallel beam (4) for the diagnosis of structural materials;
- the tightly collimated monochromatic beam (5) for precision measurements of the structural parameters and X-ray measurements.

The cone-shaped and fan-shaped beams 1 and 2 are created by the controlled diaphragms. A fan-shaped beam can be preliminarily monochromated with multilayer X-ray mirrors [14] or a refracting prism. [15]. The convergent focused monochromatic beam 3 is created by the curved multilayer mirrors [16] built according to the Montel [17] or Kirkpatrick-Baez schemes [18]. The Kumakhov polycapillary optics can help obtain a focused polychromatic beam with the focal diameter d_f of about 10 μm [19, 20]. It should also be noted that in the photon energy

- цинских применений // УФН. 2003. Т. 173. № 8. С. 899–903.
11. Бессонов Е.Г., Виноградов А.В., Турьянский А.Г. Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения для медицинских применений // ПТЭ. 2002. № 5. С. 142–148.
 12. Официальный сайт компании Excillum. – URL: <http://www.excillum.com/technology/metal-jet-technology.html>
 13. Espes E., Hansson B., Hemberg O., Johansson G., Otendal M., Tuohimaa T., and Takman P. Liquid metal jet X-ray tube technology for nanoelectronics characterization and technology // International Conference on Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics (FCMN). – Dresden, Germany, 2015. – URL: http://www.nist.gov/pml/div683/conference/upload/12_espes.pdf
 14. Spiller E., Golub L. Fabrication and testing of large area multilayer coated x-ray optics // Appl. Optics. – 1989. – Vol. 28. – Iss. 14. – P. 2969–2974.
 15. Турьянский А.Г., Пиршин И.В., Хмельницкий Р.А., Гиппиус А.А. Определение рентгеновского спектра по угловой дисперсии излучения в алмазной призме // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 73. – Вып. 9. – С. 517.
 16. Протопопов В.В. Рентгеновская оптика на многослойных зеркалах с переменным периодом. – Дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.05. – М., 2003. – 228 с.
 17. Liu W., Ice G.E., Assoufid L., Liu C., Shu B., Zschack P., Tischler J.Z., Qian J., Harchartrian R., Shu D. Hard X-ray nano-focusing with Montel mirror optics // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A. – 2011. – Vol. 649. – Iss. 1. – P. 169–171.
 18. Liu W., Ice G.E., Tischler J.Z., Khounsary A., Liu C., Assoufid L., Macrander A.T. Short focal length Kirkpatrick-Baez mirrors for a hard x-ray nanoprobe // Rev. Sci. Instrum. – 2005. – Vol. 76. – P. 113701.
 19. Kumakhov M.A. Channeling of photons and new X-ray optics // Nucl. Instrum. Meth., B. – 1990. – Vol. 48. – Iss. 1–4. – P. 283–286.
 20. Kumakhov M.A. Capillary optics and their use in X-ray analysis // X-Ray Spectrometry. – 2000. – Vol. 29. – Iss. 5. – P. 343–348.
 21. Lengeler B., Schroer C.G., Benner B., Gerhardus A., Günzler T.F., Kuhlmann M., Meyer J., Zimprich C. Parabolic refractive X-ray lenses // J. Synchrotron Rad. – 2002. – Vol. 9. – P. 119–124.
 22. Snigirev A., Snigireva I., Drakopoulos M., Nazimov V., Reznikova E., Kuznetsov S., Grigoriev M., Mohr J., Saile S. Focusing properties of X-ray refractive lenses from SU-8 resist layer // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5195. – P. 21–31.
 23. Турьянский А.Г., Пиршин И.В. Рентгеновский эшелон-монокроматор из пиролитического графита // ПТЭ. – 1998. – № 5. – С. 118–122.
 24. Турьянский А.Г. Предельные характеристики призмного рентгеновского спектрометра // ПТЭ. – 2009. – № 4. – С. 150–158.

of about 10 keV with the source focus diameter of $d_s \leq 5 \mu\text{m}$ the refractive optics in the form of compound refractive lenses can be used [21, 22]. However, the preliminary monochromatisation of the primary radiation is necessary. The focused quasi-parallel beam 4 of high intensity is generated by the parabolic X-ray mirrors. The rigidly collimated monochromatic beam 5 with an angular divergence of $\Delta\psi \leq 10''$ is created by successive reflections from the dislocation-free crystals, such as silicon crystals.

Additional schemes of the beam generation and spectrum selection can be obtained by the curved crystals and semi-transparent monochromators [23] and dispersion prism optics [24].

Creation of the multi-analytical system proposed in this paper will help solve the urgent problems as follows:

- ensure access to a wide range of experts in developing new materials and nanostructures to advanced tools of X-ray diagnostics;

- combine basic X-ray diagnosis techniques based on a single automated system;
- improve the accuracy and reliability of measurement results;
- provide for savings associated with the purchase and maintenance of equipment.

In the following study we will examine various types of workstations of the analytical system and present a number of experimental results also obtained with a source on a liquid anode.